

## **Studio della frana di Guadine (MS) attraverso fotogrammetria digitale terrestre, laser scanner e rilievi geologici**

Riccardo SALVINI<sup>(1)</sup>, Giacomo FIRPO<sup>(1)</sup>, Luigi CARMIGNANI<sup>(1)</sup>, Pier Lorenzo FANTOZZI<sup>(1)</sup>, Eros AIELLO<sup>(2)</sup>, Massimo CORNIANI<sup>(3)</sup>, Giovanni MASSA<sup>(1)</sup>, Filippo BONCIANI<sup>(1)</sup>, Matteo LAPINI<sup>(4)</sup> e Paolo COCCA<sup>(5)</sup>

<sup>(1)</sup> Centro di Geotecnologie dell'Università di Siena, Via Vetri vecchi 34, 52027 S.Giovanni V.Arno (AR), tel. 0559119484, fax 0559119439, salvinir@unisi.it; <sup>(2)</sup> GeoEco Engineering s.r.l (FI); <sup>(3)</sup> Studio Tecnico - Perito minerario Massimo Corniani, Avenza Carrara (MS); <sup>(4)</sup> Ingeo Systems s.r.l., Agenzia di Leica Geosystems (FI); <sup>(5)</sup> Microgeo s.r.l., Campi Bisenzio (FI).

### **Riassunto**

Il lavoro descrive le metodologie utilizzate ed i risultati ottenuti nell'ambito dello studio di stabilità del versante localizzato nei pressi dell'abitato di Guadine (Comune di Massa) oggetto dell'evento franoso avvenuto nella notte tra il 27 e il 28 Febbraio 2007.

Obiettivo dello studio è stato quello di creare un supporto informativo di riferimento nella pianificazione degli interventi presenti e futuri per la messa in sicurezza del versante, tenuto conto della sua posizione di incombenza sull'abitato e sulla Strada Provinciale n.5 Alta Tambura di collegamento tra Massa e cinque paesi delle Alpi Apuane (Guadine, Gronda, Redicesi, Casania e Resceto).

L'attività di analisi ha previsto l'utilizzo congiunto di tecniche di fotogrammetria digitale terrestre e laser scanner, con lo scopo di effettuare uno studio di dettaglio della frana tramite osservazioni stereoscopiche e modelli 3D fotorealistici supportati da rilievi geologici di campagna.

E' stato realizzato un nuovo inquadramento geologico - geomorfologico, con produzione di una cartografia di dettaglio in scala 1:5000, supportato da rilievi geomeccanici effettuati in sito e rappresentati in scala 1:2000. Il rilievo fotogrammetrico ha permesso l'individuazione e il dimensionamento degli elementi litoidi significativi ai fini della stabilità del versante, mentre attraverso la scansione laser scanner è stato prodotto il modello digitale del versante di alta risoluzione spaziale. Per i blocchi considerati instabili dopo analisi cinematica, modelli rigorosi del moto sono stati utilizzati per calcolare la velocità e l'energia cinetica sviluppate nelle porzioni più significative della traiettoria di caduta lungo il pendio.

### **Abstract**

*The paper describes the used methodologies and the obtained results related to the stability analysis of the slope interested, in February 27-28 2007, by the landslide occurred in the neighbourhood of Guadine urban area (Massa municipality).*

*Purpose of the study has been the creation of an informative support of data to be adopted in planning present and future safety actions in regards with the location of the rock fall (over the built-up area and along the road connecting Massa to five villages of the Apuan Alps, Guadine, Gronda, Redicesi, Casania and Resceto).*

*With the aim of studying in detail the geometry of the landslide and of the whole slope, digital terrestrial photogrammetry techniques and laser scanner survey have been applied in order to produce respectively stereoscopic views and high resolution 3D models. A GIS containing the new geological-geomorphological map at a scale of 1:5000 and geomechanical data at a scale of 1:2000 has been created. The terrestrial photogrammetric survey allowed the recognition and the measurement of lithoid elements still troubling for slope stability, while from the laser scanning the*

*high resolution digital model of the slope has been produced. Unsettled rocky blocks derived from kinematics analysis, have been analysed through rigorous motion models in a way to compute, along the most probable trajectory in the slope, the speed and the kinetic energy developed during the fall.*

### **Introduzione**

Nella notte fra il 27 e il 28 Febbraio 2007, sulla strada che collega Massa ai paesi di Guadine, Gronda, Redicesi, Casania e Resceto, si è abbattuto un migliaio di tonnellate di rocce e terra provocando il crollo di parte della sede stradale della via Alta Tambura nel torrente sottostante ed isolando quattrocento abitanti (Figura 1). Dopo gli interventi di primo soccorso riguardanti il disgaggio dei frammenti di roccia pericolanti e l'installazione di una rete provvisoria di protezione a difesa delle case di Guadine, gli Autori del presente lavoro sono stati consultati al fine di redigere una relazione descrittiva dell'evento franoso, delle cause del suo innesco, delle attuali condizioni di stabilità del versante e delle opere di messa in sicurezza da intraprendere.



*Figura 1 – Evento franoso del 27-28 Febbraio 2007 presso l'abitato di Guadine. A sinistra è possibile apprezzare il Laser Scanner utilizzato per la creazione del modello digitale del versante di elevata risoluzione spaziale*

### **Metodologie di lavoro**

Al fine di comprendere la struttura geologica del versante ed i meccanismi per i quali è avvenuto lo scivolamento di detrito, è stata prodotta una carta geologica - geomorfologica in scala 1:5000 derivata da nuovi rilevamenti, dalla bibliografia esistente (Carmignani, 1985; Di Pisa et al., 1985; Carmignani e Kligfield, 1990) e dalla carta geologica della Regione Toscana alla scala 1:10000, sezione 249110 (Figura 2).

Parallelamente, è stato effettuato un rilievo geomeccanico allo scopo di identificare i principali sistemi di discontinuità indicandone le caratteristiche di giacitura, rugosità, riempimento e presenza d'acqua. I dati di giacitura sono stati inoltre utilizzati nella verifica dell'accuratezza delle misure

ottenute dalle superfici restituite con metodi fotogrammetrici. I risultati del rilievo geomeccanico in sito, sono stati infine rappresentati in una cartografia geologica di dettaglio in scala 1:2000.

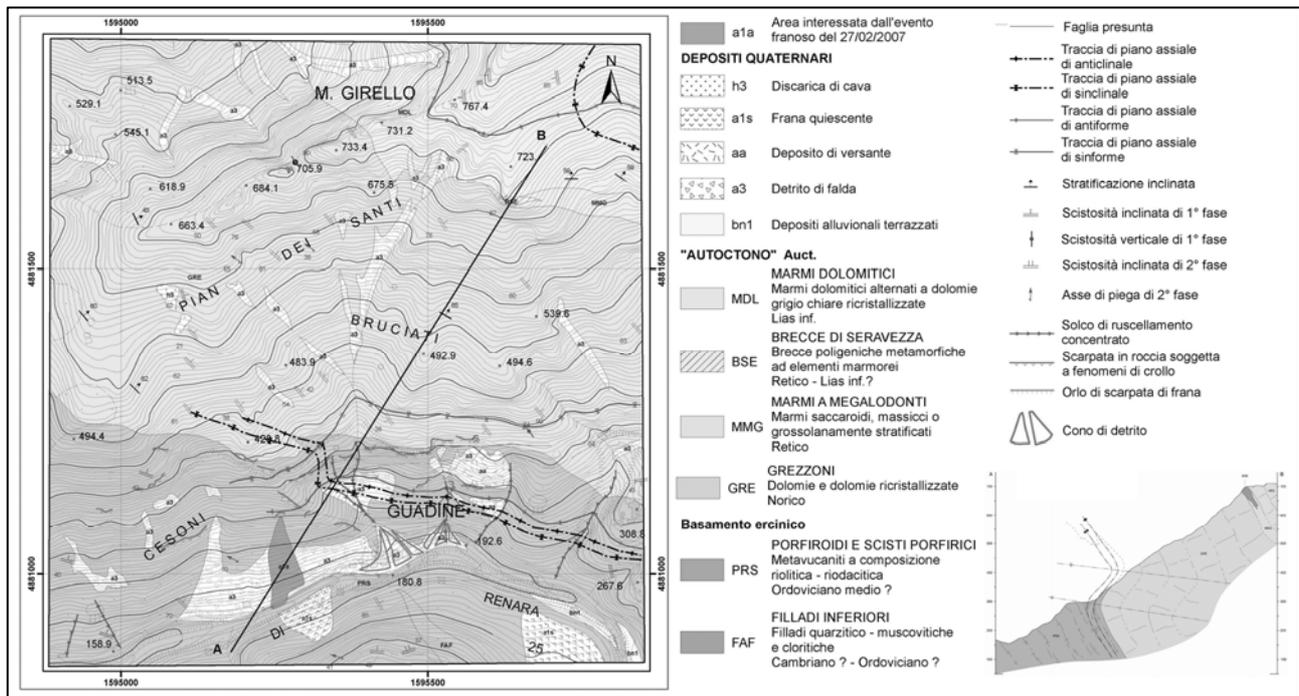


Figura 2 – Carta geologica - geomorfologica in scala 1:5000 corredata da sezione geologica

L'analisi delle superfici di discontinuità e dei blocchi instabili, è stata inoltre integrata con tecniche di fotogrammetria digitale terrestre (Lemy e Hadjigeorgiou, 2003) utili nell'individuazione di un numero consistente di strutture e nella loro caratterizzazione geometrica (posizione, superficie, volume e giacitura). La presa fotogrammetrica è stata eseguita mediante l'utilizzo di una barra calibrata collocata su un cavalletto topografico posto sul versante antistante la frana. A causa della distanza intercorrente tra il punto di presa e l'area di studio (circa 400m in linea d'aria), si è deciso di operare il rilievo con l'ausilio di due camere digitali Canon<sup>TM</sup> (Eos5D e Eos20D) rispettivamente caratterizzate da risoluzione pari a 14 e 8 megapixel. E' stata così realizzata una strisciata lungo una linea di scatto mediamente orientata N65°, il più possibile parallela al fronte oggetto del dissesto, comprendente sia prese orizzontali sia inclinate verso il basso (per un max. di 15°) in modo da ottenere la copertura fotografica completa. Per ottenere una visione stereoscopica sia d'insieme che di dettaglio, sono state scattate foto con lunghezze focali differenti, da un minimo di 10mm fino ad un massimo di 200mm.

Per risolvere le equazioni d'orientamento assoluto dei fotogrammi, nella ricostruzione dei modelli stereoscopici, sono state utilizzate le coordinate di punti notevoli riconoscibili sulle foto (Kasser e Egels, 2002; Linder, 2003). E' stato quindi effettuato un rilievo topografico di dettaglio collimando *marker* naturali ed artificiali con una Stazione Totale Laser Leica<sup>TM</sup> TCRP 1202 R300. Sul punto di origine del rilievo è stato materializzato un caposaldo GPS in ottone, successivamente misurato con un GPS doppia frequenza Leica<sup>TM</sup> System 1200 in modalità differenziale RTK (*Real Time Kinematic*) grazie al servizio offerto dalla rete *SpiderNet* della Leica Geosystems<sup>TM</sup> mediante connessione via GSM integrato. La base da cui sono stati ottenuti i valori di correzione *Real Time* è quella più vicina, posta a Borgo a Mozzano (LU) distante circa 30 Km dalla zona di studio; questa distanza, essendo nelle condizioni limite di *baseline* correttiva, garantisce una precisione di ± 5-10cm.

Per l'orientamento dei fotogrammi è stato utilizzato il modulo *LPS* del software ERDAS<sup>TM</sup> IMAGINE 9.1. Nella procedura di orientamento interno sono servite le lunghezze focali utilizzate

ed i valori di dimensione del *pixel* delle singole camere fotografiche (Canon<sup>TM</sup> Eos 5D: 8.19 $\mu$ m; Canon<sup>TM</sup> Eos 20D: 6.47 $\mu$ m). L'orientamento esterno (relativo ed assoluto) è stato eseguito tramite l'utilizzo di *Tie Point* e di *GCP* (*Ground Control Point*) determinati topograficamente, entrambi omogeneamente distribuiti sulle foto. I *Tie Point* sono stati inseriti manualmente e in modo automatico mediante gli algoritmi di autocorrelazione d'immagine presenti nel software. La procedura di triangolazione aerea ha consentito di orientare rispetto al sistema di riferimento locale i fotogrammi e di valutare l'RMSE (*Root Mean Square Error*) di entrambe le strisciate. Per l'orientamento effettuato con distanza focale pari a 20mm, l'RMSE è risultato di circa 1 pixel corrispondente, per una scala nominale dei fotogrammi di 1:255, a 10cm al suolo; per l'orientamento effettuato con distanza focale pari a 10mm, l'RMSE è risultato di circa 0.5 pixel corrispondente, per una scala nominale dei fotogrammi di 1:460, a 9cm al suolo.

Infine, come ultima attività di campagna, è stato realizzato un rilievo laser scanner dell'intero versante interessato dalla frana, mediante strumento RIEGL<sup>TM</sup> Z420i, in modo da creare il modello digitale di elevazione di alta risoluzione spaziale (7cm sul fronte). L'inquadramento topografico del modello in coordinate assolute è stato garantito mediante la materializzazione di punti di riferimento plano-altimetrici misurati tramite la Stazione Totale. E' stata prodotta una nuvola di punti successivamente corretta e depurata degli elementi di disturbo (es. vegetazione) ed infine interpolata a formare il DDEM (*Digital Dense Elevation Model*) rappresentato mediante formato TIN (*Triangular Irregular Network*).

## Risultati

La frana in studio è stata classificata come uno scivolamento di detrito da imputare in parte al particolare assetto idrogeologico della zona e, in parte, alla scarsa manutenzione del versante caratterizzato dalla presenza di ruderi e vecchi muretti di sostegno e di alberi cresciuti a dismisura e piegati dai venti.

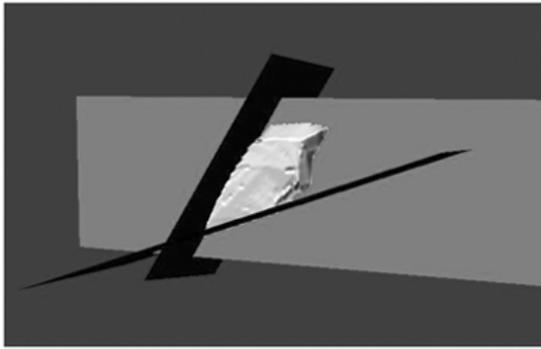
L'analisi stereoscopica ha portato all'individuazione dei cosiddetti "blocchi mobili", vale a dire elementi litoidi liberi di cedere che possono essere costituiti da elementi facenti parte di ammassi rocciosi e delimitati da individuate superfici di discontinuità orientate in modo tale da consentire il cedimento ("blocchi mobili in posto"), oppure elementi litoidi di dimensioni considerevoli dislocati dall'originario ammasso roccioso e che appoggiano a varie quote sul versante ("blocchi dislocati"). Per i "blocchi mobili in posto" sono state materializzate le superfici di discontinuità che li delimitano mediante la stereorestituzione di triangoli complanari con esse, in modo da ottenere dei piani la cui giacitura (direzione di immersione ed inclinazione) identifichi l'attitudine geometrica delle discontinuità.

Per ogni superficie di discontinuità relativa ai "blocchi mobili in posto", è stato costruito un DSM (*Digital Surface Model*) in formato TIN, il quale, analizzato tramite le funzioni *Aspect* e *Slope* del software Esri<sup>TM</sup> ArcMap, ha consentito di ricavare rispettivamente i dati di direzione di immersione rispetto al Nord e di inclinazione rispetto al piano orizzontale.

Attraverso la conoscenza della giacitura delle suddette discontinuità, è stato possibile, mediante proiezioni stereografiche, definire i principali sistemi presenti nell'ammasso (Phillips, 1972; Goodman, 1989; Kliche, 1999; Bruschi, 2004).

A partire dalle superfici che delimitano i blocchi mobili (sia "in posto" che "dislocati") e dal loro DSM formato vettoriale (nuvole di punti localizzati nello spazio da una terna di coordinate X, Y e Z), è stata ricostruita la geometria di ognuno di essi mediante il software Rhinoceros<sup>TM</sup> SR3.

Il risultato di queste operazioni è la costruzione, per ogni blocco mobile, di un solido tridimensionale del quale siano evidenti i rapporti geometrici con i piani di discontinuità che lo delimitano (nel caso dei "blocchi in posto") e di cui si possa calcolare il volume, l'area della superficie totale e le coordinate (X, Y e Z) dei centroidi del volume e dell'area espresse nel sistema di riferimento assoluto, Sistema Nazionale Gauss – Boaga fuso OVEST (Figura 3).



Blocco	32		
Volume	394,72 m <sup>3</sup>		
Area	412,76 m <sup>2</sup>		
Condizione	In posto		
Centroide Area	1595284,36	4881057,37	249,39
Centroide Volume	1595284,78	4881057,42	249,30

Figura 3 – Esempio di modellazione 3D e calcolo delle dimensioni di uno dei “blocchi mobili in posto” individuati

Mediante l'utilizzo del programma GEOSTRU/GEOROCK<sup>TM</sup> è stata effettuata, per ogni blocco individuato, una simulazione di distacco e caduta attraverso modelli di analisi rigorosa del moto. Ciò è servito essenzialmente per avere delle indicazioni sull'energia cinetica posseduta dal blocco durante il moto di caduta dal punto di distacco al piede del versante, in modo da poter pianificare il dimensionamento di eventuali opere di difesa. L'elaborazione ha permesso di avere indicazioni circa la porzione di versante interessata dal movimento del blocco (nel caso specifico è stato importante valutare se il movimento potesse interessare la sede stradale che sottende il versante stesso), la velocità raggiunta e l'energia cinetica sviluppata nelle porzioni più significative della traiettoria (Figura 4).

Dall'analisi dei dati provenienti dalle simulazioni, è emerso che la maggior parte degli elementi litoidi esaminati è in grado di sviluppare, lungo la propria traiettoria di movimento, valori di energia cinetica di gran lunga superiori a quelli che possono essere dissipati dalle comuni opere di difesa passiva (reti e barriere paramassi).

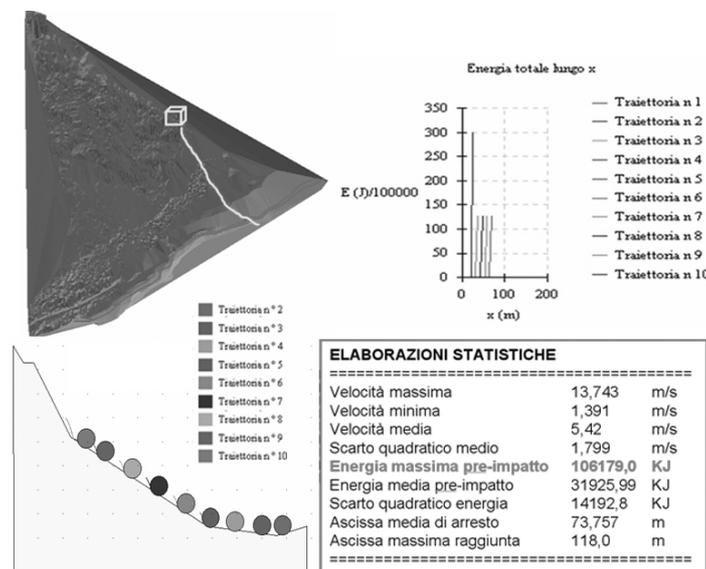


Figura 4 – Esempio di analisi di caduta di un blocco attraverso modelli rigorosi del moto

## Conclusioni

Le attività svolte hanno permesso la produzione di una nuova cartografia geologica - geomorfologica di dettaglio basata sullo studio del modello stereoscopico prodotto in fotogrammetria digitale, integrato da rilevamento laser scanner e dati di campagna.

L'analisi stereoscopica ha permesso di identificare 35 “blocchi mobili” posti a diverse altezze del versante. Per ogni “blocco mobile” sono stati definiti posizione, volume, e baricentro e, per “i

blocchi mobili in posto”, sono state determinate le giaciture delle discontinuità che li delimitano ed elaborate proiezioni stereografiche che ne definiscono forma e meccanismi di mobilità.

Attraverso i rilievi fotogrammetrici e il laser scanner è stato costruito il DDEM del versante sul quale sono stati drappeggiati gli elaborati ortofotografici e la cartografia geologica e geomorfologica prodotte. Questi elaborati hanno aiutato a definire l’ubicazione, la geometria e le caratteristiche delle traiettorie di caduta dei blocchi a cui applicare le varie procedure di calcolo. Tutti i dati derivanti dall’attività di analisi sono stati integrati in un *Geodatabase* facilmente consultabile e interrogabile mediante interfaccia grafica ed aggiornabile all’interno di qualsiasi piattaforma GIS. L’analisi delle traiettorie, inoltre, ha dimostrato che la sede stradale è ampiamente vulnerabile ai “blocchi mobili” individuati e che l’energia in gioco non può essere contrastata solo con interventi di difesa passiva tipo barriere paramassi. In questo senso, i risultati del lavoro suggeriscono l’utilizzo di sistemi di bonifica attiva tipo reti ancorate, reti addossate, tiranti di ancoraggio operanti in trazione, chiodature e bullonature. Tali opere infatti, progettate e dimensionate secondo le situazioni specifiche di ciascun “blocco mobile” individuato, permettono di migliorare le caratteristiche geomeccaniche del versante. Solo successivamente, onde ridurre il rischio di caduta di blocchi minori, si potranno prevedere opere passive del tipo delle barriere paramassi. Infine, considerato che gli inneschi del dissesto sono legati allo scorrimento di acque superficiali e presenti all’interno delle coltri che producono rispettivamente un rilevante trasposto solido verso valle e un incremento delle pressioni interstiziali favorevoli agli sforzi tangenziali che conducono allo scorrimento, si evidenzia come la riduzione del rischio potrebbe essere ottenuta con un’accurata disposizione di fossi di guardia e di canalette coadiuvati da sistemi di canne drenanti sotterranee disposte a gradoni nella direzione di massima pendenza.

## **Bibliografia**

- Bruschi A. (2004), “Meccanica delle rocce, nella pratica geologica ed ingegneristica”, *Collana di Geotecnica ed Ingegneria Geotecnica*, Dario Flaccovio Editore, pp.398
- Carmignani L. (1985), “Carta geologico-strutturale del complesso metamorfico delle Alpi Apuane (Foglio Nord) - Scala 1:25.000”, *LAC - Litografia Artistica Cartografica, Firenze (Italia)*
- Carmignani L. e Kligfield R. (1990), “Crustal extension in the Northern Apennines: the transition from compression to extension in the Alpi Apuane core complex”, *Tectonics*, 9: 1275-1303
- Di Pisa A., Gattiglio M., Meccheri M. e Vietti N. (1985), “Nuovi dati sulle Metabasiti della Valle del Giardino del Basamento Paleozoico Aprano” *Atti Soc. Tosc. Sc. Nat.*, Ser. A, 95: 89-103
- Goodman R.E. (1989), “Introduction to rock mechanics”. *John Wiley & Sons*, New York, pp.562 (chapter 8, Application of Rock Mechanics to Rock Slope Engineering, 293-340)
- Kasser M. e Egels Y. (2002), “Digital Photogrammetry”, Taylor & Francis, Londra, pp. 347
- Kliche, C.A. (1999), “Rock Slope Stability”, *Society for Mining, Metallurgy, and Exploration*, Littleton, pp. 252
- Lemy F. e Hadjigeorgiou J. (2003), “Discontinuity trace map construction using photographs of rock exposures”, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 40: 903 – 917
- Linder W. (2003), “Digital Photogrammetry, Theory and Applications”, *Springer*, Berlino, pp. 189
- Phillips F.C. (1972), “The Use of Stereographic Projection in Structural Geology”, *Arnold, London*, pp. 90